

УДК 621.396.96

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ В МОНОСТАТИЧЕСКИХ И БИСТАТИЧЕСКИХ РЛС

к.т.н. А.В. Ксендзук, И.А. Евсеев, к.т.н. С.И. Клевец
(представил д.т.н., проф. В.К. Волосюк)

Рассмотрены особенности применения шумоподобных сигналов в моно-статических и бистатических РЛС. Результаты моделирования показывают, что использование шумоподобных сигналов в бистатических системах не приводит к ухудшению характеристик оценок и качества интерпретации полученных радиолокационных изображений.

Постановка проблемы и анализ литературы. Известные достоинства шумоподобных сигналов (ШПС), такие как высокая помехозащищенность, возможность разделения каналов передачи данных по кодовому признаку, высокая устойчивость к многолучевому распространению, а также высокая разрешающая способность при радиолокационных и навигационных измерениях, предопределили их использование в различных системах связи и навигации. Из анализа литературы [1 – 5] видно, что широкое развитие получают методы фазовой манипуляции, обеспечивающие возможность сравнительно простого контроля изменения фазы сигнала. Однако широкого применения в радиолокационных системах эти сигналы пока не нашли.

Одной из причин является сложность обеспечения необходимой «развязки» приемного и передающего трактов. Для многопозиционных систем данная проблема решается естественным образом.

Целью работы является рассмотрение особенностей применения шумоподобных сигналов в бистатической РЛС, как основной составляющей многопозиционной системы.

Особенности применения шумоподобных сигналов в обзорных радиолокационных системах. Рассмотрим одиночную РЛС, облучающую участок некоторой поверхности сигналом, представляющим собой последовательность немодулированных импульсов с прямоугольными огибающими длительностью τ и периодом повторения T_R (далее простой импульсный сигнал), рис. 1. Будем полагать, что условие однозначности отсчетов выполнено: $t_{d \max} + \tau - t_{d \min} \leq T_R$, где $t_{d \max}$, $t_{d \min}$ –

максимальное и минимальное время задержки. Корреляционные функции исследуемых сигналов (для случая обработки путем согласованной фильтрации) показаны на рис. 2.

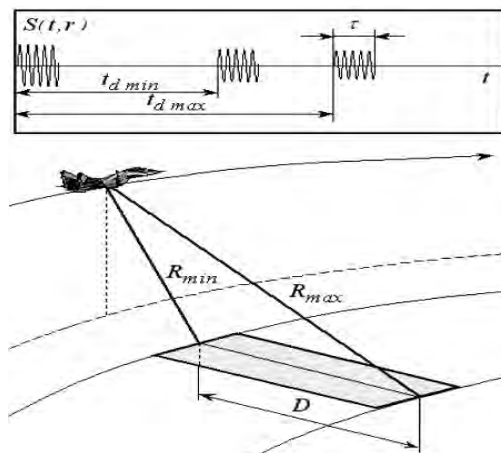


Рис. 1. Исследуемая РЛС

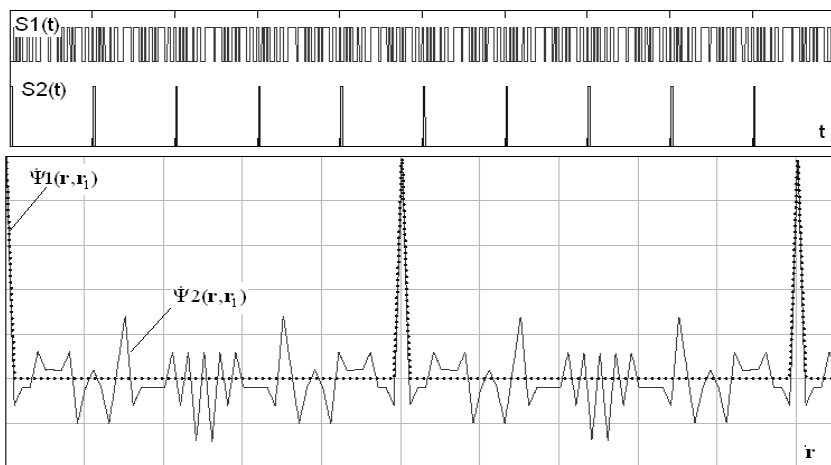


Рис. 2. Функции неопределенности сигналов в рассматриваемой системе

Выполним сравнение результатов обработки при использовании различных сигналов – периодического импульсного и периодического фазоманипулированного. Формирование ПСП последовательности осуществлялось таким образом, чтобы длительность одиночного бита была равна длительности импульса, показанного на рис. 1.

В результате обработки шумоподобного или импульсного сигналов получим следующий выходной эффект оптимальной системы [1]:

$$\langle \hat{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \rangle = \int_D \langle \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \rangle \dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1) d\vec{r}_1. \quad (1)$$

Из (1) видно, что смещение оценки для функционально-детерминированной модели сигнала определяется характером поведения боковых лепестков функции неопределенности и комплексного коэффициента отражения. Для большинства практически важных случаев можно полагать, что оценка является несмещенной. Однако если комплексный коэффициент отражения в пределах области обзора является медленно изменяющейся функцией, для несмещенности оценки необходимо обеспечить равенство нулю среднего значения боковых лепестков пространственной функции неопределенности (ПФН).

Оценим изменение отношения сигнал/помеха $\mu(\vec{r})$ при использовании ШПС в рассматриваемой РЛС. Для простого радиоимпульса $\mu(\vec{r})$ определяется выражением $\frac{\langle |Y_S(\vec{r})|^2 \rangle}{\langle |Y_N(\vec{r})|^2 \rangle}$ [2], которое может быть записано в виде

$$\mu(\vec{r}_1) = \frac{K^2 E_S}{N_0} \int_D \sigma^0(\vec{r}) |\tilde{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 d\vec{r} \cong K^2 \frac{E_S}{N_0} \sigma_A^0(\vec{r}_1) \Delta Y, \quad (2)$$

где $\tilde{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)$ – нормированная функция неопределенности; E_S , E_R – энергии принимаемого и опорного сигналов; K – коэффициент затухания; $\sigma^0(\vec{r})$ – удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР), равная произведению среднего значения удельной эффективной поверхности рассеяния σ_A^0 и размера элемента разрешения ΔY .

Для случая использования шумоподобного сигнала отношение сигнал/помеха можно представить в виде

$$\mu(\vec{r}_1) = K^2 \frac{E_S}{N_0} \sigma_A^0(\vec{r}_1) \Delta Y \frac{1}{1 + \frac{E_S}{N_0} K^2 \int_{D''} \sigma^0(\vec{r}) |\tilde{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 d\vec{r}}, \quad (3)$$

где выделена область боковых лепестков АКФ – D'' .

Если обозначить $\mu_0(\vec{r}_1)$ отношение сигнал/помеха в обзорной РЛС для простого импульсного сигнала, при этом (3) можно записать так

$$\begin{aligned} \mu(\vec{r}_1) &= K^2 \frac{E_S}{N_0} \sigma_A^0(\vec{r}_1) \Delta Y \frac{1}{1 + K^2 \frac{E_S}{N_0} \sigma_A^0(\vec{r}_1) \Delta Y} \frac{\int_{D'} \sigma^0(\vec{r}) |\tilde{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 d\vec{r}}{\int_{D''} \sigma^0(\vec{r}) |\tilde{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 d\vec{r}} = \\ &= \mu_0(\vec{r}_1) \left[\frac{1}{1 + \mu_0(\vec{r}_1) \xi(\vec{r}_1)} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где величина $\xi(\vec{r}_1)$ определяется выражением

$$\xi(\vec{r}_1) = \frac{\int_{D''} \sigma^0(\vec{r}) |\tilde{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 d\vec{r}}{\int_{D'} \sigma^0(\vec{r}) |\tilde{\Psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)|^2 d\vec{r}} = \frac{\chi(D - 2\Delta Y)}{\Delta Y}, \quad (5)$$

зависящим от величины χ – уровня боковых лепестков автокорреляционной функции шумоподобного сигнала.

Исследование целесообразности применения шумоподобных сигналов в бистатистических РСА. В отличие от неподвижной обзорной РЛС, в системе с синтезированием апертуры разрешение по пространственным координатам соответствует разрешению в плоскости (τ, F) , где τ – время запаздывания, F – доплеровский сдвиг частоты [3, 4]. Рассмотрим бистатистическую радиолокационную станцию с синтезированной апертурой антенны (РСА) (рис. 3).

Для дальнейшего исследования отметим тот факт, что основной

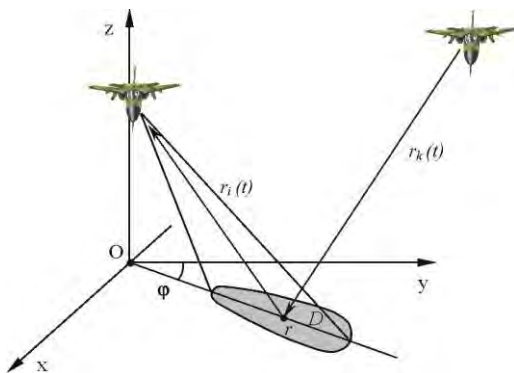


Рис. 3. Исследуемая бистатистическая РСА

принцип неопределенности в радиолокации $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{\Psi}(\tau, F)|^2 d\tau dF = \text{const}$ [5] для РСА, как системы с пространственно-временной обработкой, может быть представлен в виде $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{\Psi}(x, y)|^2 dx dy = \text{const}$. Это означает, что по-

грешность оценки, вносимая «просачиванием» отражений от поверхности и целей вне главного максимума (то есть по боковым лепесткам) практически не зависит от вида сигнала.

Для проверки этого факта было выполнено моделирование алгоритмов формирования радиолокационных изображений поверхности путем первичной обработки в системе, изображенной на рис. 3 для импульсного и шумоподобного сигналов. В рамках этого моделирования полагалось, что энергии простого импульсного сигнала и ШПС равны, шумоподобный сигнал представляет собой фазоманипулированную периодическую последовательность, период повторения равен периоду повторения простого импульсного сигнала, длительности одиночного символа ПСП и одиночного радиоимпульса совпадают, условия однозначного отсчета выполняются.

Результаты оценки УЭПР для обзорной РЛС в виде их пространственной зависимости от дальности показаны на рис. 4.

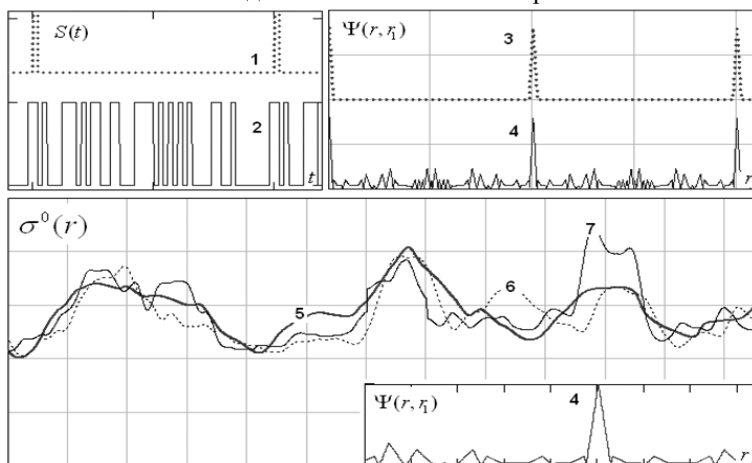


Рис. 4. Результаты оценки УЭПР в обзорной РЛС:

1 – импульсный сигнал; 2 – шумоподобный сигнал; 3 – ПФН импульсного сигнала; 4 – ПФН шумоподобного сигнала; 5 – исходное распределение $\sigma^0(\vec{r})$; 6 – оценка УЭПР при использовании импульсного сигнала; 7 – оценка УЭПР при использовании шумоподобного сигнала

Из результатов моделирования видно, что при использовании ПСП в обзорной РЛС возможно существенное искажение результатов оценки, вызванное накоплением отражений по боковым лепесткам.

Аналогичное моделирование было выполнено для бистатистической РСА. Функции неопределенности для импульсного и шумоподобного сигналов представлены на рис. 5, а результаты построения радиолокаци-

онного изображения (РЛИ) – на рис. 6.

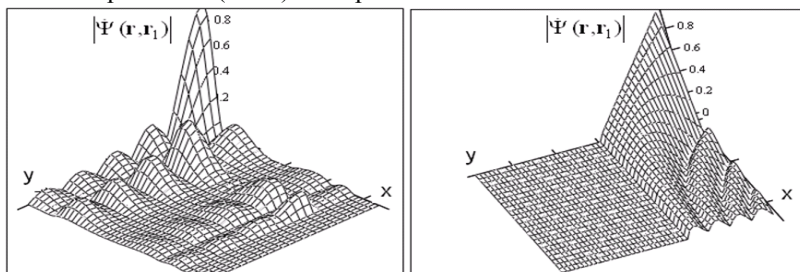


Рис. 5. Пространственные функции неопределенности шумоподобного (справа) и импульсного (слева) сигналов

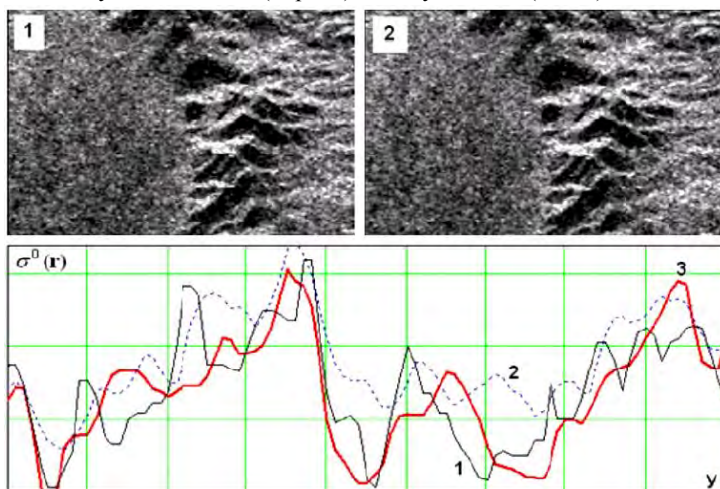


Рис. 6. Результаты формирования РЛИ в PCA:
1 – поведение УЭПР; 2 – результат обработки в PCA с использованием простого импульсного сигнала; 3 – результат обработки в PCA с использованием шумоподобного сигнала

Выводы. В моностатических и бистатических системах с синтезированием апертуры антенны применение шумоподобных сигналов не приводит к ухудшению характеристик оценок и качеству интерпретации полученных радиолокационных изображений.

В обзорных РЛС использование шумоподобных сигналов в общем случае нецелесообразно вследствие высокого уровня помех, вызванных наличием боковых лепестков в автокорреляционной функции.

Для многопозиционных систем дистанционного зондирования существенное влияние на качество получаемых оценок имеет степень ортогональности сигналов, излучаемых различными передающими элемен-

тами. Степень ортогональности необходимо измерять по значению сред-неквадратического уровня взаимокорреляционных функций в простран-ственных или частотно-временных координатах.

Если сигналы являются квазиортогональными, необходимо исполь-зовать модифицированные алгоритмы обработки, полученные с учетом характера взаимной корреляции между различными элементами МПРСА. Так, например, можно использовать оптимизацию по макси-мальному значению отношения сигнал/помеха для каждой бистатистиче-ской пары i -й приемник k -й передатчик

$$N_{t,r}\{u_{ik}(t)\} \rightarrow \max_N \frac{\langle |H \left\{ \operatorname{Re} \int_D \dot{F}_{ik}(\vec{r}) \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) d\vec{r} \right\}|^2 \rangle}{\langle |H \left\{ \operatorname{Re} \sum_{j \neq k, D} \dot{F}_{ij}(\vec{r}) \dot{S}_{ij}(t, \vec{r}) d\vec{r} \right\}|^2 \rangle + \langle |H \{n_{ik}(t)\}|^2 \rangle},$$

где $H\{\cdot\}$ – некоторый оператор обработки входного процесса. Для всей многопозиционной группировки необходимо решить интегрально-матричное уравнение, приводящее к оптимальным операторам комплексирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фалькович С.Е., Волосяк В.К., Горбуненко О.А. Радиотехнические систе-мы дистанционного зондирования. – Х.: ХАИ, 2000. – 156 с.
2. Ксендзук А.В. Пространственные функции неопределенности многопози-ционных систем дистанционного зондирования, основанных на использо-вании спутников GPS // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – Х.: ХАИ. – 2003. – Вып. 1. – С. 26 – 32.
3. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
4. Реутов А.П., Михайлов Б.А., Кондратенков Г.С. Бойко Б.В. Радиолокаци-онные станции бокового обзора. – М.: Сов. радио, 1970. – 360 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1974. – Кн. 1. – 552 с.

Поступила 24.11.2004

КСЕНДЗУК Александр Владимирович, канд. техн. наук, докторант Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Область научных интере-сов – дистанционные системы зондирования поверхности, статистическая обработка.

ВСЕЕВ Игорь Анатольевич, адъюнкт ХУ ПС. В 1998 году окончил КИ ВВС. Об-ласть научных интересов – дистанционные системы зондирования поверхности, стати-стическая обработка.

КЛЕВЕЦ Сергей Иванович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры ХУ ПС.

В 1994 году окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – противодействие системам обнаружения летательных аппаратов, взаимодействие электромагнитных волн с плазмой.